

Petri 网在可靠性分析中的研究综述

方 欢 方贤文 王丽丽

(安徽理工大学理学院 淮南 232001)

摘 要 可靠性的相关研究在安全关键系统中具有重要意义,利用 Petri 网可以实现对可靠性的形式化建模以及动态行为的描述。首先对基于 Petri 网的可靠性分析与研究的基本方法进行分类。其次,着重分析了利用随机 Petri 网求解系统可靠性的基本方法和步骤,针对等价于 Markov 过程和非 Markov 过程的两类系统,重点讨论了基于随机 Petri 网的系统可靠性分析方法,并指出各类分析研究方法的优缺点。进一步,分析和比较了其他各种类型 Petri 网在可靠性分析中的应用方法及其优缺点。最后,总结了一些常见的 Petri 网计算机仿真软件,并针对基于 Petri 网的可靠性研究展望了几个有价值的研究方向。

关键词 Petri 网,可靠性,故障定位,仿真分析

中图分类号 TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.007

Review of Reliability Analysis Based on Petri Nets

FANG Huan FANG Xian-wen WANG Li-li

(Science College, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract The research of reliability is important in safety-critical systems, and formal modeling and dynamic behaviors descriptions can be realized by Petri nets. Firstly, as for the research of reliability based on Petri nets, the basic methods and resolving processes were summarized and classified. Secondly, the methodology and procedures based on stochastic Petri nets were analyzed in detail, and as for the two kinds of systems, which are the Markov process equivalent systems and Non-Markov process equivalent systems, the analysis methods based on stochastic Petri nets were concluded, and their advantages and disadvantages were generalized. Furthermore, the advantages and disadvantages were analyzed in detail for reliability study by other types of Petri nets. Lastly, some common simulating platforms were summarized, and research directions in reliability analysis using Petri nets in future work were discussed.

Keywords Petri nets, Reliability, Fault identification, Simulation analysis

随着科学技术的发展,应用系统的结构日趋复杂,多功能的系统大量出现,对可靠性的要求越来越高,尤其是安全关键系统或安全苛求系统,如航空航天^[1]、交通运输^[2-5]、通信技术^[4,6]、高技术兵器^[7-8]等重要的工程领域关注的安全苛求系统。在这些系统中,可靠性已经成为最重要的评价标准之一。可靠性的相关工作贯穿于系统或软件的开发初期、开发过程中以及后续的评估体系中,主要内容可分为可靠性预计^[9]、可靠性设计^[2,10]以及可靠性试验^[1-4,8]、可靠性的分析和评估^[5-8,11]等等。

可靠性研究目前已经有很多成熟的方法和理论,如蒙特卡罗法^[6,12,13]、二项式展开法^[6]、故障树法^[14,15]、最小割集法^[14,16]、模糊理论法^[5,17,18]、遗传算法计数法^[19]、马尔可夫状态图法以及随机 Petri 网法^[3,8,13]等等。其中 Petri 网因具备坚实的数学基础和图形化的建模方式,而可以极大地方便对系统进行可靠性建模,进而借助一系列的软件工具对其进行模拟和分析。

本文主要对利用 Petri 网对可靠性进行研究和分析的相

关结论加以综述:首先,对现有文献中利用 Petri 网分析可靠性的基本方法进行了分类;其次,针对随机 Petri 网方法的可靠性求解方法进行分析,这是目前基于 Petri 网的可靠性研究应用最广泛的一种方法。进而,将此类基于随机 Petri 网的可靠性求解方法与基于 Markov 链的可靠性求解方法进行比较分析,得出相关结论,除此之外,还重点讨论了系统行为为非 Markov 过程的系统可靠性分析方法;再次,总结了其他类型的 Petri 网在可靠性分析研究中的应用,并分析和比较各类方法的优缺点;最后,列举了一些比较成熟的 Petri 网计算机模拟平台,以便于实现可靠性研究的软件模拟和计算工作。

本文第 1 节总结 Petri 网在可靠性分析研究中的基本方法分类;第 2 节详细分析了随机 Petri 网在可靠性分析和研究中的基本思路和研究方法,由于满足一定约束条件的随机 Petri 网(Stochastic Petri Nets, SPN),系统行为可以等价于 Markov 链,因此基于 SPN 的可靠性分析是目前的研究热点,并取得了一系列比较完善的结论;第 3 节重点阐述了其他 Petri 网类型在可靠性分析研究中的基本方法和应用,并分析

到稿日期:2013-03-27 返修日期:2013-06-02 本文受国家自然科学基金(61272153,61170059),安徽省自然科学基金(1208085MF105)资助。

方欢(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论与应用、智能控制,E-mail:fanghuan0307@163.com;方贤文(1975—),男,博士,教授,主要研究方向为 Petri 网理论与应用、可信软件和服务计算;王丽丽(1982—),女,硕士,讲师,主要研究方向为 Petri 网理论与应用。

了分析研究中存在的问题和难点;第4节列举了目前可以利用的 Petri 网软件模拟软件,为可靠性的模拟仿真提供了技术支持;第5节讨论了可靠性分析研究中未来可能的研究方向和应用难点;最后对全文进行了总结。

1 Petri 网在可靠性分析研究中的基本方法

Petri 网,特别是随机 Petri 网在系统可靠性分析中占有重要位置,其研究的基本方法在相关的理论研究和案例分析中主要可以分为 5 大类^[15]:系统的基本行为描述方法、系统的故障树简化方法、系统的故障诊断研究方法、系统可靠性指标的解析计算方法和系统可靠性仿真分析方法。

(1)系统的基本行为描述方法:根据已经建立的系统 Petri 网模型,分析模型系统的可达性、可逆性、活性等动态性质,从这些性质分析中总结系统具备的一些行为特点,为可靠性分析和研究做好铺垫工作。

(2)系统的故障树的表示与简化方法:故障树分析模型是一种传统的可靠性分析方法,可以将故障树看作系统中的故障传播的逻辑关系,将故障树转换成 Petri 网模型,通过可达网的可达性或者通过关联矩阵的计算,得到最小的割集。

(3)系统的故障诊断研究方法:基本网系统是 Petri 网系统的一个特例,在基本网系统中,一个库所最多含有一个标识,可以利用库所的这种标识特性,通过可达标识来判断相应的故障是否发生。

(4)系统可靠性指标的解析计算方法:可靠性指标也是系统性能指标的一个重要组成部分,通过一般数学分析方法对可靠性模型进行分析,一般仅能给出某些参量的计算方法。由于一般的数学分析方法不具备反映中间过程的能力,而基于 Petri 网模型的可靠性指标计算方法,在和数学方法满足相同的约束条件下,可以清晰地描述系统状态之间的动态转移过程,这种特点以随机 Petri 网(SPN)最为明显。

(5)系统可靠性仿真分析方法:随着计算机工程的应用技术的发展,可靠性的分析与研究不仅仅局限在可靠性指标的计算、故障诊断等方面,还体现在复杂系统的可靠性仿真分析研究上。仿真分析是计算机研究和可视化分析的重要途径,因此可以利用已有的仿真分析工具对可靠性进行建模、分析和模拟,为可靠性研究在工业应用中拓宽应用广度。

2 随机 Petri 网在可靠性分析应用中的主要研究思路

2.1 与 Markov 过程同构的系统可靠性求解方法

2.1.1 简单的 SPN 建模及其分析

近 10 年来,对可靠性研究比较成熟的方法是利用随机 Petri 网(Stochastic Petri Nets, SPN)对可靠性进行建模,然后将可靠性或可用性的求解指标计算转换为同构的马尔可夫链的计算。通过 Petri 网构建的 SPN 模型,建立网系统的关联矩阵(即状态转移概率矩阵),通过计算机求解或者解析求解可靠性或可用性的性能指标,相关的研究见文献[14-16, 21-28]。

定义 1 随机 Petri 网由七元组构成, $SPN = (P, T, F, K, W, M_0, \lambda)$ 。 P, T, F, K, W 的定义和加权 Petri 网定义相同; $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ 为变迁激发速率集合。

在可靠性建模中, $1/\lambda_i$ 表示变迁 t_i 的平均延迟时间。

已经证明,若 SPN 为 K (某一常数)有界,则 SPN 模型与

连续时间 Markov(CTMC)状态一一对应,且可以通过线性方程组求得系统概率分布,从而得到系统的可靠性特征量。SPN 的优点是可以计算机自动进行马尔可夫过程的状态分析,并通过状态方程得到系统的可靠性指标。

令 $p_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 和 $q_j (j=0, 1, 2, \dots, n-1)$ 分别表示系统处于正常状态的位置和故障状态的位置的稳态概率。利用式(1)可以求出该系统处于各位置的稳态概率:

$$\begin{cases} \Pi \cdot K = 0 \\ \sum_{i=0}^n P_i + \sum_{j=0}^{n-1} Q_j = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_i 表示稳态情况下处于位置 p_i 的概率, Q_j 表示稳态情况下处于位置 q_j 的概率, Π 是元素为 P_i, Q_j 的稳态概率向量, K 为变迁状态转移矩阵。

利用 SPN 的分析方法有解析法和仿真法,解析法将 SPN 的可达图映射成 MCs 的状态转移矩阵,然后用经典的 MCs 方法进行分析。但是随着系统的复杂性、关联性的增强,SPN 同构的 MCs 难以获得,系统状态空间的组合爆炸是最突出的问题,而且 MCs 方法要求 Petri 网变迁的时延服从负指数分布,否则难以求解。Petri 网动态仿真可在一定程度上避免定量分析中的维数灾难问题,但是通过动态仿真只能得到可靠性指标的数值解,而无法求解相关指标的解析解。

SPN 的模拟工具有很多,如使用最为广泛的 GSPN(稍后内容将具体阐述各种模拟软件)。这些模拟工具大都均可以实现以下 3 个方面的功能:(1)图形化的编辑界面,定义了库所、变迁、弧以及其他函数的图形框架;(2)计算机动态模拟过程,可以动态地显示被考察系统当前所处的随机状态;(3)性能分析和评价部分,可以对用户定义的性能指标进行计算,通过计算得到可靠性指标的数值解。

2.1.2 利用随机 Petri 网实现最小割集的求解

在可靠性分析过程中,故障树的构造是一种比较常用的方法,用来对被控系统运行过程中可能出现的各种故障或错误进行形式化分析。通过分析可以得知故障之间的因果关系或系统的故障模型。然而,由于故障树模型是一种静态分析模型,不能研究被考察系统的可靠性的动态过程,因此,在基于 Petri 网的可靠性建模方法中可以用库所表示零部件失效、软件缺陷以及人为失误等,用变迁来表示系统状态的变化及故障时间的传播,库所和变迁之间的有向连接用来表征故障的传播方向,标识表征故障时间的发生,库所中标识的数目变化反映了系统状态的动态变化过程,由此即可以建立基于 Petri 网的故障模型^[16]。这种基于 Petri 网的故障模型能够动态仿真系统的故障行为,是静态故障树模型的一种有效补充。

一般地,基于 Petri 网的故障模型的建立,与故障树分析方法类似,首先确定故障模型的顶事件,然后再依次分析出第一层事件、第二层事件...。而故障 Petri 网的定性分析的主要任务是寻找导致顶事件发生(系统故障)所有可能的失效模式及其状态组合,也即是找出故障 Petri 网中全部的最小割集。割集是能使顶事件发生的底事件集合。最小割集是一种包含了最小数量且为最必须的底事件的割集。故障 Petri 网的一个割集,表示该系统发生故障的一种可能性,即一种失效模式。故障 Petri 网的全部最小割集代表顶事件发生的所有可能,即系统的全部故障模式。

可以将故障树看作系统中的故障传播的逻辑关系,一般

的单调关联故障树只含有与门和或门,因而可以很方便地转换成 Petri 网表示,通过可逆网的可达性或者通过关联矩阵的计算,得到最小的割集。通过静态故障树得到最小割集需要 8 步,但是通过 Petri 网只需要 3 步^[15]。

因此,利用随机 Petri 网找出系统全部的最小割集具有重要意义,根据最小割集可以有针对性地改进系统设计和制定维修策略,用最合理的方法提高系统可靠性水平。

2.2 非 Markov 过程等价系统的随机 Petri 网可靠性求解方法

由于在 SPN 的定义中只能允许变迁的实施速率服从指数分布的随机变量,因此可以将模型转化为具有马尔可夫特性的随机过程,但是在很多的实际应用系统中,其对应的 SPN 模型的变迁实施速率不服从指数分布,这就导致了研究非马尔可夫随机 Petri 网(Non-Markovian Stochastic Petri Nets, NMSPN)系统的必要性。

现有的一些文献^[29]总结了 NMSPN 的分析技术:根据变迁的实施时间分布函数从指数分布扩展到确定时间和指数分布,即 PH 分布(Phase-Type Distributed),最后到一般分布,相应地形成了确定与随机 Petri 网(Deterministic and Stochastic Petri Nets, DSPN)、含有 PH 分布变迁的随机 Petri 网(Stochastic Petri Nets with Phase-Type Distributed Transition, ESPs)和马尔可夫再生随机 Petri 网(Markov Regenerative Stochastic Petri Nets, MRSPN),这些网系统的演变就是 NMSPN 演变过程。

非马尔可夫随机 Petri 网的主要分析技术^[29-31]有:补充变量分析方法、Phase-Type 分布近似方法、基于模型分解和迭代性能分析技术、马尔可夫再生理论。这些理论的主要思路是,在符合条件的假定下,通过移除系统状态可达图中的消失状态,得到压缩的状态可达图,并在此基础上创建由离散状态和连续变量组成的随机过程,使用微积分方程来描述,通过求解微积分方程可以得到系统的各种性能指标。

但是 NMSPN 最大的问题是,由于求解过程复杂,目前还没有相应的计算机模拟软件能够对其动态运行过程进行仿真。

3 其他类型 Petri 网方法在可靠性研究中的应用

3.1 其他类型的 Petri 网在可靠性研究中的应用

除了经常使用的随机 Petri 网,还有许多其他形式的 Petri 网系统^[4,7,10,21,32-34]被应用到可靠性的建模与分析研究中,如有色 Petri 网^[4,7,10]、面向对象 Petri 网^[21]、时序 Petri 网^[32]、时间 Petri 网^[33]、受控混合随机 Petri 网^[34]等等。值得一提的是,应用时间 Petri 网研究可靠性其实是嵌入到基于随机 Petri 网或者有色 Petri 网的可靠性研究中的一种特例,在系统分析中基于时间 Petri 网的建模与仿真仅仅专注于系统行为在时间维度上的特点,因此时间 Petri 网可以作为有色 Petri 网或随机 Petri 网的一个子类来进行考虑。

(1)面向对象 Petri 网(Object-Oriented Petri Nets, OOPN),是将面向对象编程的思想融合到 Petri 网建模过程中,突出各个对象或类之间的交互情况。基于 OOPN 的建模方式有利于软件开发人员根据所建立的 OOPN 模型实施软件系统的设计工作,在许多实际的应用系统中有较广泛的应用。

(2)时序 Petri 网(Temporal Petri Nets, TPN)。由于 Petri 网和时序逻辑被认为是分析并发系统重要且有效的两种

理论工具,TPN 将 Petri 网和时序逻辑结合在一起,同颜色 Petri 网、随机 Petri 网等一般 Petri 网类型相比,它能够较好地表达事件间的时序关系以及并发系统中与时序相关的性质。

TPN 对变迁的触发序列绑定了加以限制的时序逻辑公式,因此可以用于对复杂系统的控制,但是也存在诸多难点,主要表现在:

(a)对于大型复杂系统,如何对其进行时序 Petri 网的建模,并确定完整的时序逻辑公式?

(b)缺乏计算机模拟平台,不能实现计算机的自动分析。

(c)时序逻辑公式的确定完全是主观的,因此系统的正确性仅仅由命题逻辑来证明存在一定的主观性。

(3)受控混合随机 Petri 网。除了一般 Petri 网考虑影响系统行为的离散变量,混合随机 Petri 网还考虑了连续变量,将离散变量和连续变量作为影响系统行为的两种因素,比较客观和完整地表示系统特点。这类系统在建模语义的表示上更加准确和详细,但是难点就是分析工具比较欠缺,除了可达标识图,还未见其他较完善的分析技术。

3.2 其他方法与随机 Petri 网联合使用求解可靠性

在系统的建模分析中,除了随机 Petri 网以及其他类型的 Petri 网变型系统,还往往将计算机科学中一些比较先进的技术和算法融合进来^[12,17-19,35-40],在可靠性研究领域形成一个重要的研究领域。

与随机 Petri 网技术联合使用的分析方法,主要有蒙特卡罗方法^[12]、模糊数学分析法^[17]、粗糙理论分析法^[18,39]、遗传算法^[19]、神经网络分析法^[17]、矩母函数法^[35-37]、Petri 网行为表达式法^[37]、计算树逻辑^[38]、灰度分析法^[40]等等。这些分析技术大都依据被分析系统的特点而设定,其中神经网络方法结合神经网络的学习算法,可通过对样本数据学习来调整模型中的参数,以获得系统内部的等效结构,从而达到计算出非样本数据的可靠度,这种方法是使得 Petri 网模型具备学习能力的一个重要手段。除此之外,Petri 网行为表达式法和矩母函数法将 PN 机的行为理论与传统 Petri 网建模技术结合在一起,可以有效地解决一般 Petri 网状态可达图难以获得和状态空间爆炸的问题。

4 常见的模拟工具

Petri 网的模拟工具有好几十种,参见文献^[41],其中不仅有支持 P/T 网、颜色 Petri 网、时间 Petri 网、随机 Petri 网、排队 Petri 网等类型,一些近年来获得研究关注的复杂 Petri 网,如混杂 Petri 网、抑制 Petri 网也有了相应的模拟工具,如带时间元素的层次颜色 Petri 网工具 CPN Tools、带时间元素的随机 Petri 网工具 F-net、带时间元素的混杂 Petri 网工具 HISIm、层次排队 Petri 网工具 QPME 等等,但是可惜的是时序 Petri 网还未见有相应的模拟工具。这些模拟工具一般都含有以下 3 个方面的功能:(1)图形化的编辑界面,定义了库所、变迁、弧以及其他函数的图形框架;(2)计算机动态模拟过程,可以动态地显示被考察系统当前所处的随机状态,以及显示系统在仿真运行过程中产生的可达图或者折叠可达图信息;(3)性能分析和评价功能,可以对用户定义的性能指标进行计算。

在实际的系统分析或建模过程中,建模者可以根据系统

的特点和平台的使用对语言进行有选择的使用。

5 关于 Petri 网的可靠性未来研究问题的讨论

综上所述,在对可靠性进行建模分析的 Petri 网系统中,若该系统能够被转换为同等语义下的 Markov 过程,则存在相应的计算机模拟工具对其进行仿真,但是当系统足够复杂时,需要借助一定的化简方法和一些等价运算(如矩母函数、Petri 网行为表达式),来有效降低可达图生成的难度和避免状态空间爆炸。

依据 Petri 网在可靠性分析研究中已经取得的研究成果,未来在可靠性研究上比较有意义的研究领域可能包括:

(1)对一个大型的复杂系统,根据其实际特点,建立符合这个系统特点的体系完整的 Petri 网,提出可靠性分析方法,见文献[42,43]。

(2)针对一个具体的复杂系统,建立适合解决此问题的模拟分析工具,见文献[44,45]。

(3)针对一个复杂的大系统,有两个方面的问题值得关注,首先,研究在网折叠技术下的可靠性分析方法;其次,当一个大系统的某个节点可靠性发生变化时,如何更新已有的可靠性分析,以尽量少的计算完成可靠性的更新。这项研究内容可以使用系统具有更好的灵活性和扩展性,而目前还未有成熟的研究成果。

(4)针对分布式系统,目前还没有相关的文献来研究分布式环境下的 Petri 网可靠性分析技术,因此基于 Petri 网的分布式可靠性分析方法具有很强的研究价值。

结束语 基于 Petri 网的可靠性分析和研究理论,首先在可靠性模型的建立上取得了比较完善的结论,根据被研究系统的特点,可以分析其相应的时间属性、概率属性以及时序属性等等。虽然建立的 Petri 网模型具备良好的语义描述,但是在系统分析技术上,除了随机 Petri 网具有较高精度的分析软件,其他的分析方法还局限在可达树的构造和精简技术的研究上。除了随机 Petri 网的可靠性分析,其他类型的 Petri 网分析方法一般都是根据相应的属性建立语义完整的 Petri 网模型,而后对可达树进行一定的状态压缩和分析。除 SPN 之外,研究者很少针对可达图或可达树以外的研究方法进行分析,这也是目前需要深入研究的重点和难点。

参考文献

- [1] 秦旭东,陈宗基. 基于 Petri 网的非相似度余度飞控计算机可靠性分析[J]. 控制与决策, 2005, 20(10): 1173-1176
- [2] 赵惠祥,陆正刚,耿传智. 基于 Petri 网的城市轨道交通系统运营可靠性模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 355-358
- [3] 张炎亮,何桢,李亚东. 基于随机 Petri 网的煤仓储运系统可靠性分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(6): 631-635
- [4] 徐田华,赵红礼,唐涛. 基于有色 Petri 网的 ETCS 无线通信可靠性分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(1): 38-42
- [5] 邵立周,刘玲艳,吴晓平. 船舶电力系统可靠性评估的自适应模糊 Petri 网方法[J]. 海军工程大学学报, 2010, 22(2): 6-10
- [6] 杨孟辉,廖建新,吴乃星. 下一代网络核心业务平台的可靠性分析[J]. 通信学报, 2006, 27(4): 60-66
- [7] 原菊梅,侯朝桢,高琳,等. 基于有色 Petri 网的复杂武器系统任

务可靠性建模及估计[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2563-2566

- [8] 宋小庆,吴松平,常天庆,等. 基于随机 Petri 网的装甲车辆综合电子系统可靠性研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(3): 45-49
- [9] Yang S K. A Condition-based Failure-Prediction and Processing-Scheme for Preventive Maintenance[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2003, 52(3): 373-383
- [10] Katsigiannis Y A, Georgilakis P S, Tsinarakis G J. A Novel Colored Fluid Stochastic Petri Net Simulation Model for Reliability Evaluation of Wind/PV/Diesel Small Isolated Power Systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, A, 2010, 40(6): 1296-1309
- [11] Ramos G, Sanchez J L, Torres A, et al. Power System Security Evaluation Using Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 316-322
- [12] 王芳,侯朝桢. 用蒙特卡罗和 Petri 网方法估计随机流网络的可靠性[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(7): 604-608
- [13] 苏春,沈戈. 基于广义随机 Petri 网的系统可靠性建模与仿真软件开发[J]. 现代设计与先进制造技术, 2007, 36(9): 45-48
- [14] 金光,周经伦,何小怀. 一种基于 Petri 网的可靠性分析方法[J]. 小型微型计算机系统, 2001, 22(8): 1022-1024
- [15] 张涛,武小悦,谭跃进. Petri 网在系统可靠性分析中的应用[J]. 国外可靠性与环境实验技术, 2003(1): 60-65
- [16] 苏春,沈戈,徐映秋. 制造系统动态可靠性建模理论及其应用[J]. 机械设计与研究, 2006, 22(5): 17-19, 44
- [17] 原菊梅,侯朝桢,王小艺,等. 复杂系统可靠性估计的模糊神经 Petri 网方法[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 687-691
- [18] 原菊梅,侯朝桢,高琳,等. 粗糙 Petri 网及其在多状态系统可靠性估计中的应用[J]. 兵工学报, 2007, 28(11): 1373-1376
- [19] 蔡林峰,谭观音. 基于遗传算法的信息系统可靠性优化设计[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(14): 2578-2580
- [20] 沈戈,苏春,许映秋. 基于 Petri 网理论的动态系统可靠性建模方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2006(2): 1-4
- [21] 武小悦,沙基昌. 几种典型系统可靠性分析的 GOOPN 模型[J]. 系统工程, 1999, 17(4): 73-77
- [22] 宋才胜,曾熠,罗雪山. 基于 Petri 网的通信网络可靠性评估建模仿真[J]. 计算机仿真, 2004, 21(8): 98-101
- [23] 张友生,李雄. 基于 Petri 网的软件体系结构可靠性分析[J]. 计算机工程与应用, 2006(5): 69-73
- [24] 汪凯,张恒喜,王卓健. 基于 Petri 网的复杂可修复系统可靠性仿真研究[J]. 光电与控制, 2006, 13(5): 50-53
- [25] 郭雪松,孙林岩,徐晟. 一类基于随机着色 Petri 网的多级供应链可靠性模型的研究[J]. 运筹与管理, 2006, 15(6): 66-70
- [26] 朱连章,李妍琛. 基于随机 Petri 网的软件可靠性分析[J]. 计算机系统应用, 2007(7): 22-25
- [27] 朱连章,李妍琛. 基于随机 Petri 网的软件可靠性分析方法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(22): 5349-5352
- [28] 孙晓哲,李卫琪,陈宗基. 非空计算机系统分层混合可靠性建模方法[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(2): 277-283
- [29] 原菊梅,侯朝桢,王小艺,等. 基于补充变量的非马尔可夫随机 Petri 网及其应用[J]. 计算机工程, 2007, 33(9): 19-21
- [30] 孟海宁,齐勇,侯迪. 基于非马尔可夫随机 Petri 网的软件再生建模与分析[J]. 计算机学报, 2007, 30(12): 2212-2217
- [31] Bondacalli A, Chiaradonna S, Giandomenico F D, et al. Dependability Modeling and Evaluation of Multiple-Phased Systems U-

- sing DEEM[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53(4): 509-522
- [32] 杜彦华, 刘春煌, 曹松. 行车安全综合监控系统的时序 Petri 网描述及验证[J]. 铁道学报, 2005, 27(4): 11-15
- [33] 杜军威, 徐中伟, 王树梅. 联锁逻辑模型的安全性分析[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(2): 1-4, 32
- [34] 原菊梅, 侯朝桢, 王小艺, 等. 考虑环境因素的分布式系统可靠性建模及其分析[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 309-312, 317
- [35] 张君一, 谢里阳, 王正. 基于广义随机 Petri 网的 CIMS 多任务可靠性研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(33): 26-28
- [36] 张君一, 谢里阳, 王正. 基于 ESPN 的制造系统多任务可靠性研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(7): 1029-1032
- [37] 庞善臣, 蒋昌俊. 一种基于不变量结构分解的工作流性能分析方法[J]. 计算机学报, 2010, 33(5): 908-918
- [38] 范贵生, 虞慧群, 陈丽琼, 等. 基于 Petri 网的服务组合故障诊断与处理[J]. 软件学报, 2010, 21(2): 231-247
- [39] 刘玲艳, 吴晓平, 田树新. 基于粗糙集和 Petri 网的随机流网络可靠性评价方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1273-1277
- [40] 刘玲艳, 吴晓平. 基于灰色随机 Petri 网的构件化软件可靠性早期评估方法[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(1): 16-22
- [41] <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tools/quick.html>
- [42] Kuo C-H, Huang Han-pang. Failure Modeling and Process Monitoring for Flexible Manufacturing Systems Using Colored Timed Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(3): 301-312
- [43] Kuo C-H, Huang Han-pang. Failure Modeling and Process Monitoring for Flexible Manufacturing Systems Using Colored Timed Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(3): 301-312
- [44] 陆文, 徐峰, 吕建. 一种开放环境下的软件可靠性评估方法[J]. 计算机学报, 2010, 33(3): 452-462
- [45] 董云卫, 王广仁, 张凡, 等. AADL 模型可靠性分析评估工具[J]. 软件学报, 2011, 22(6): 1252-1266
-
- (上接第 8 页)
- [3] Hoare C A R. The Emperor's Old Clothes[J]. Commun. ACM, 1983, 24(2): 75-83
- [4] Pierce B C. Types and Programming Languages[M]. The MIT Press, 2002
- [5] Wilson L B, Clark R G. Comparative Programming Languages (Third Edition)[M]. Addison-Wesley, 2001
- [6] Jones R, Lins R D. Garbage collection: algorithms for automatic dynamic memory management[M]. John Wiley & Sons, 1996
- [7] Goodenough J B. Exception handling: issues and a proposed notation[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(12): 683-696
- [8] Kiniry J R. Exceptions in Java and Eiffel: Two Extremes in Exception Design and Application[J]. Exception Handling, LNCS, 2006, 4119: 288-300
- [9] Budd T A, Justice T P, Pandey R E. General-Purpose Multiparadigm Programming Languages: An Enabling Technology for Constructing Complex Systems[C]// First IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems, 1995
- [10] Budd T A. Multiparadigm Programming in Leda[M]. Addison-Wesley, 1994
- [11] van Roy P. Multiparadigm Programming in Mozart/Oz [C]// Second International Conference MOZ, 2004
- [12] WG9. ISO/IEC 8652: 2007(E) (Ed. 3). Ada Reference Manual [M]. 2007
- [13] Barnes J. Ada 2005 Rationale: The Language - The Standard Libraries[M]. Springer, 2008
- [14] Carlisle M. Automatic OO parser generation using visitors for Ada 2005[C]// Proceedings of the 2006 Annual ACM SIGAda International Conference on Ada, Albuquerque, New Mexico, USA, November 2006
- [15] Schonberg S. Ada 2012 Intrim Report[C]// Proceedings of the 2010 Annual ACM SIGAda International Conference on Ada, 2010
- [16] Barnes J. A Brief Introduction to Ada 2012[M]. The GNAT Pro Company, 2011
- [17] WG9. ISO/IEC 8652: 2012(E). Ada Reference Manual[M]. December 2012
- [18] Odersky M, et al. An Overview of the Scala Programming Language (Second Edition)[R]. Technical Report LAMP-REPORT-2006-001, 2006
- [19] Matsumoto Y. Matsumoto Yukihiro code No Sekai[M]. Nikkei Business Publicaions, 2011
- [20] Tate B A. Seven Languages in Seven Weeks: A Pragmatic Guide to Learning Programming Languages[M]. Pragmatic Bookshelf, 2010
- [21] Beazley D M. Python Essential Reference (Fourth Edition)[M]. Addison-Wesley, 2011
- [22] Lattner C, Adve V. LLVM: A Compilation Framework for Lifelong Program Analysis & Transformation[C]// Proceedings of the International Symposium on Code Generation and Optimization, 2004
- [23] Scott M L. Programming Language Pragmatics (Third Edition) [M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2008
- [24] ISO/IEC DTR 19768[R]. Draft Technical Report on C++ Library Extensions, 2005
- [25] ISO/IEC 14882: 2011. Information Technology-Programming Languages-C++[S]. 2011
- [26] Sun Microsystems, Inc. Java™ Platform, Enterprise Edition (Java EE) Specification, v5[S]. 2006
- [27] Microsoft Corporation. C# Language Specification Version 3.0 [S]. 2007
- [28] Harper R. Programming in Standard ML (Draft; Version 1.2 of 11.02.11)[S]. 2011
- [29] Goodenough J B. Exception handling: issues and a proposed notation[J]. Communications of the ACM CACM Homepage archive, 1975, 18(12): 683-696
- [30] 徐宝文. 试论高级程序设计语言的设计与评价标准[J]. 南京航空学院学报, 1987, 19(2)